第 40 卷　第 2 期　　天 文 学 进 展　　Vol. 40, No. 2
2022 年 6 月　　PROGRESS IN ASTRONOMY　　June., 2022

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2022.02.04

星前核的多方气体静力学模型

李大磊

(中国科学院　新疆天文台，乌鲁木齐　830011)

摘要： 星前核是研究恒星形成初始条件和恒星形成极早期阶段的重要样本。密度和温度是描述星前核最基本的两个物理参数，也是利用非局域热动平衡辐射转移计算方法研究分子激发条件和计算分子柱密度，进行天体化学模拟计算所必需的物理参数。Barnard 68 (B68) 是一个非常典型的星前核，它具有类似球形的结构，非常适合用来检验球对称的理论模型。在球对称的坐标系中，利用多方的气体静力学模型拟合了 B68 的尘埃消光数据，模型给出的星前核 B68 的质量为 0.8 $M_{\odot}$。与之前等温的气体静力学模型相比，该模型不仅能拟合尘埃的消光数据，且拟合结果与 B68 中气体非等温分布的观测结果相符，另外与压强的观测数据也符合得很好。

关　键　词： 分子云核；恒星形成；星前核；流体力学

中图分类号： P142.9　　**文献标识码：** A

1　引　言

分子云中的致密核是恒星形成的场所。星前核 (prestellar core) 是自引力束缚的致密分子云核。星前核可以在自引力作用下坍缩形成原恒星，并最终形成恒星[1]。星前核代表了整个恒星形成过程中最初始的状态和极早期的阶段，对于设定恒星形成数值模拟和理论研究的初始条件提供了很强的约束[1−3]。因此，星前核是研究恒星形成初始条件和极早期阶段的重要样本。

星前核的物理条件，如密度和温度，可以通过尘埃的消光、尘埃的发射和分子谱线的观测进行测量。例如，通过尘埃消光的观测数据可以得到星前核的柱密度分布，结合模型模拟进而获得星前核的密度结构[4]，而通过远红外和亚毫米波的多波段观测数据可以同时获得星前核的密度结构和尘埃的温度结构[5, 6]。星前核的气体温度需要通过分子谱线的观测获得，如 NH_3[7−9]。

利用尘埃和分子谱线的观测数据所估算出的密度和温度结构，是描述星前核最基本的

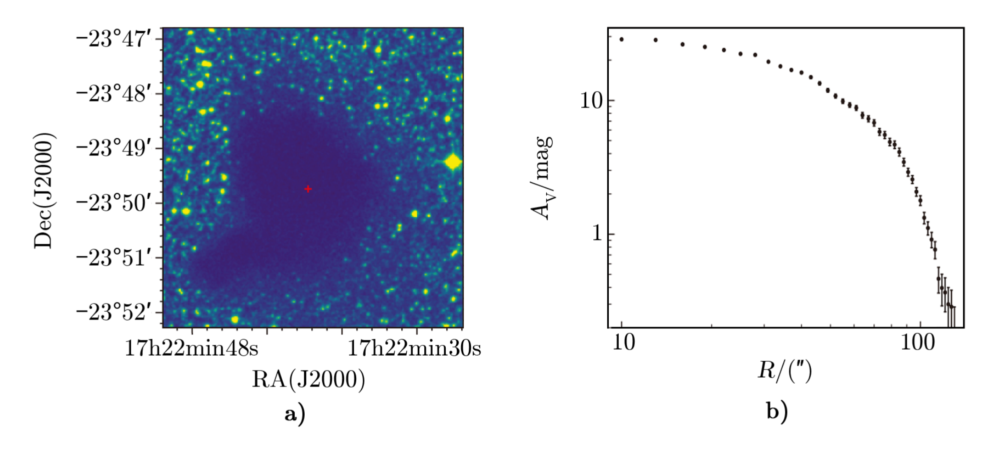
收稿日期： 2021-06-23；　**修回日期：** 2021-12-13

资助项目： 新疆维吾尔自治区自然科学基金青年项目(2017D01B53)

通讯作者： 李大磊，lidalei@xao.ac.cn

物理参量。在非局域热动平衡的辐射转移计算中，密度和温度是研究分子谱线激发条件、模拟分子谱线轮廓、估算分子丰度进而研究分子耗散和尘埃冰形成的必要输入参数[10−14]。另外，在进行恒星形成理论研究[2, 3]、数值模拟[1] 和天体化学模拟计算[15]的过程中，密度和温度是最基本的物理量。

Barnard 68 (B68) 是一个典型的星前核，具有近圆形结构 (见图 1)，可以用来检验恒星形成相关的模型[4]。利用光学和近红外波段的观测数据，Avles 等人[4]精确地测量了星前核 B68 中的尘埃对背景星的消光，通过观测数据构建了尘埃消光随着星前核半径的径向分布 (见图 1 b))。尘埃的消光可以通过 $N(\mathrm{H}+2\mathrm{H}_2)/A_\mathrm{V}=2\times10^{21}\ \mathrm{cm}^{-2}\cdot\mathrm{mag}^{-1}$[16] 转换成氢分子的柱密度，进而可以研究 B68 的密度结构。进一步研究发现，B68 的密度结构可以很好地用等温的静力学模型 (即等温的莱恩-埃姆登方程) 来描述[4]。但是，后来更多的观测结果显示，尤其是分子谱线的观测数据表明，B68 的气体温度并非等温，而是中间温度高为 10 K 左右，边界大概 6 ~ 7 K[17]。因此，有必要利用更精确的模型重新研究 B68 这一典型星前核的密度结构和温度结构。本文的第 2 章介绍多方气体静力学模型，以及进行模型拟合的基本步骤；第 3 章为模拟的结果和讨论；第 4 章对全文进行总结与展望。



注：a) 数字巡天 (Digitized Sky Survey) 的光学图像，红色的“+”号表示尘埃消光最大的位置；b) 尘埃消光的径向分布[4]。

图 1　星前核 B68 的光学图像和尘埃消光的径向分布

2　模型与拟合

2.1　尘埃消光数据

这里所使用的星前核 B68 的数据来自参考文献 [4]。利用光学和近红外波段对 B68 区域星光的观测，Avles 等人[4]精确地测量了星前核 B68 中的尘埃对背景星的消光，得到了尘埃消光的径向分布。

2.2 多方的气体静力学模型

星前核 B68 可以看作一个球对称的理想气体球，并且在引力和热压力共同作用下处于流体静力学状态。由于 B68 的气体温度分布为内部高边界低[17]，因此为了更合理地描述 B68 的密度结构和温度结构，我们采用球对称的多方气体静力学模型[18]。质量密度为：

$$\rho=\rho_0\theta^n=\mu_g m_{\mathrm{H_2}} n_{\mathrm{H_2}}\theta^n \quad , \tag{1}$$

其中，ρ_0 和 $n_{\mathrm{H_2}}$ 分别是星前核中心的质量密度和数密度，$m_{\mathrm{H_2}}$ 是 $\mathrm{H_2}$ 的质量，μ_g 是权重，n 是多方指数。θ 由下面的微分方程所决定，即：

$$\frac{1}{\xi^2}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\xi}\left(\xi^2\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}\xi}\right)+\theta^n=0 \quad , \tag{2}$$

其中，ξ 是一个无量纲的半径，与星前核半径之间的关系为：

$$r=\sqrt{(n+1)K\rho_0^{1/n-1}/(4\pi G)}\xi \quad , \tag{3}$$

其中，K 是常数，G 是引力常数。星前核中心的质量密度应该是有限的，式 (2) 的边界条件为：

$$\theta(0)=1, \quad \theta'(0)=0 \quad . \tag{4}$$

星前核气体的压强为：

$$P=K\rho^{1+\frac{1}{n}} \quad , \tag{5}$$

根据理想气体的状态方程，利用式 (1) 和 (5) 可以得出星前核的气体温度结构为：

$$T=\frac{\mu m_{\mathrm{H}}}{k_{\mathrm{B}}}\frac{P}{\rho}=\frac{\mu m_{\mathrm{H}}}{k_{\mathrm{B}}}K\rho^{1/n} \quad , \tag{6}$$

其中，m_{H} 是氢原子的质量，k_{B} 是玻尔兹曼常数，μ 是平均分子权重。设星前核的中心温度为 T_0，由式 (6) 可以得出：

$$K=\frac{T_0k_{\mathrm{B}}}{\mu m_{\mathrm{H}}\rho_0^{1/n}}=\frac{T_0k_{\mathrm{B}}}{\mu m_{\mathrm{H}}(\mu_g m_{\mathrm{H_2}} n_{\mathrm{H_2}})^{1/n}} \quad . \tag{7}$$

星前核的质量为：

$$M=-4\pi\left[\frac{(n+1)T_0k_{\mathrm{B}}/(\mu m_{\mathrm{H}})}{4\pi G}\right]^{1.5}\rho_0^{-0.5}\xi^2\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}\xi}\bigg|_{\xi=\xi_{\max}} \quad , \tag{8}$$

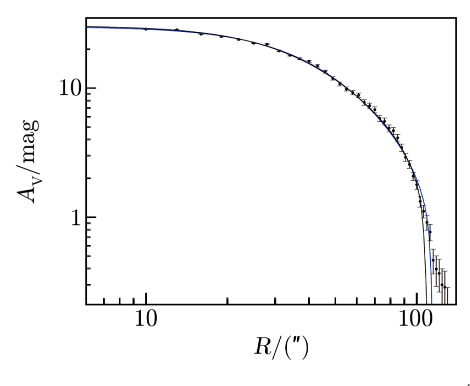
其中，$\xi_{\max}$ 为最大的无量纲半径值。通过这个多方的气体静力学模型可以研究星前核 B68 的密度结构、温度结构、压强结构并计算其质量。

2.3 模型拟合

利用多方的气体静力学模型拟合 B68 的尘埃消光数据 (图 1 b))，其基本步骤如下所述。首先，给定一个多方指数 n 值，结合式 (4)，利用四阶的龙格-库塔数值计算方法可以求出式 (2) 的一个数值解。其次，给定星前核的一个中心数密度 n_{H_2} 值，可以得出星前核的一个数密度分布为 $n_{H_2}\theta^n(\xi)$。第三，B68 中心的气体温度为 $T_0 = 10$ K[8, 9]，把上述的 n, n_{H_2} 和 T_0 的数值带入式 (7) 并结合式 (3)，可以得出云核半径 r 和 ξ 的关系。第四，给定一个 ξ 的数值，就可以得到星前核的半径。另外，由于观测到的尘埃消光数据是角尺度的函数，所以需要给定星前核的距离 D，从而把模型给出的线尺度转换成角尺度。最后，把得到的数密度随着半径变化的分布沿着视线积分得到柱密度，通过 $N(\mathrm{H+2H_2})/A_\mathrm{V} = 2\times10^{21}\ \mathrm{cm^{-2}\cdot mag^{-1}}$[16] 把柱密度转换成尘埃消光，然后对比理论上的消光数值与观测的尘埃消光数据。综上所述，在整个计算过程中，模型包括 n, n_{H_2}, ξ 和 D 共 4 个自由参数。为了寻找与观测数据符合最好的参数值，我们采用蒙特卡洛优化算法，通过优化软件包 MAGIX① 实现[19]。

3 结果与讨论

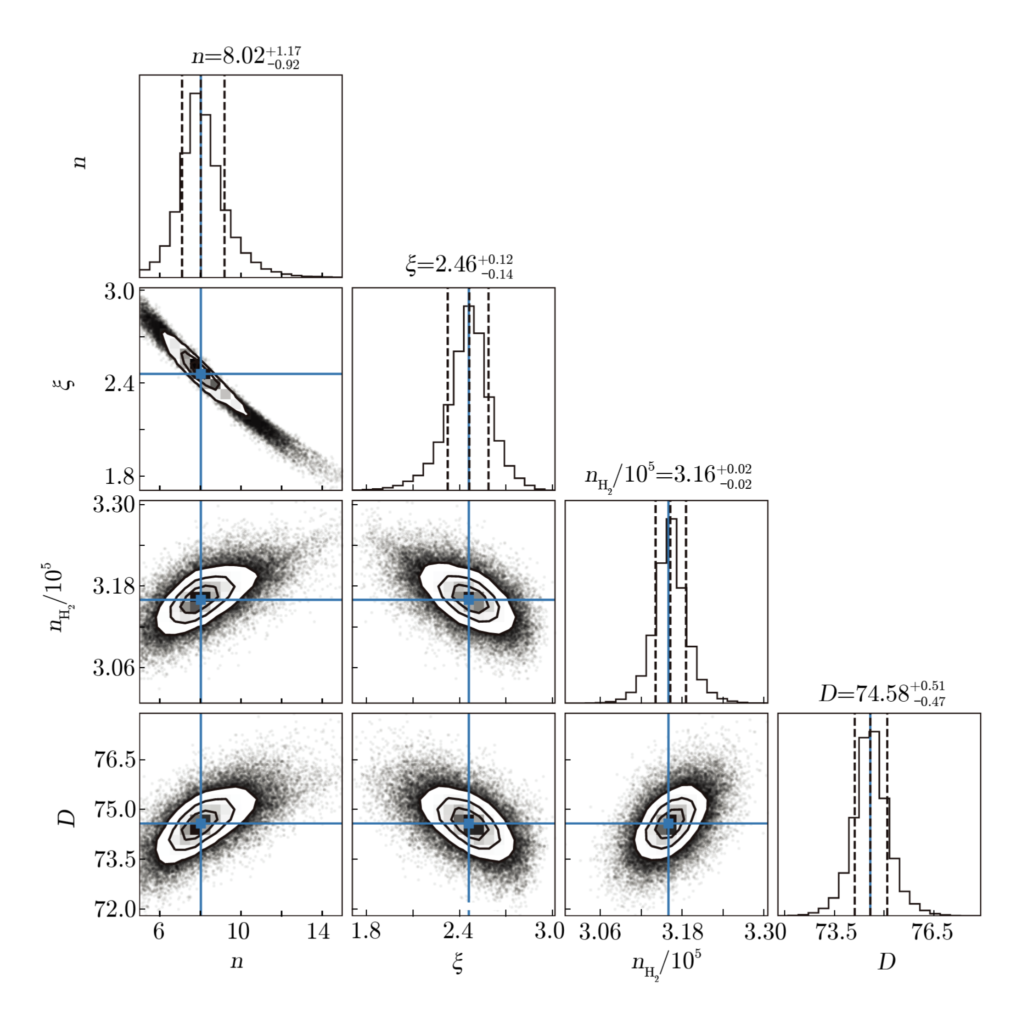
利用蒙特卡洛的优化算法，得到与观测数据相符的理论模型 (见图 2)。图 2 给出了等温的气体静力学模型与多方的气体静力学模型拟合观测数据的对比结果。相较于等温模型，该多方模型给出了更大的半径。图 3 显示了模型中 4 个自由参数的后验函数分布，这些一维的后验函数非常接近高斯分布。分布函数的最大似然值为最佳拟合参数值，误差取自分布函数的 16% 和 84% 的分位数。由图 3 可知最佳拟合的参数值分别为多方指数 $n = 8.02^{+1.17}_{-0.92}$，星前核的无量纲半径 $\xi = 2.46^{+0.12}_{-0.14}$，中心 H_2 的数密度 $n_{H_2} = 3.16^{+0.02}_{-0.02} \times 10^5\ \mathrm{cm^{-3}}$，以及星前核的距离 $D = 74.58^{+0.51}_{-0.47}$ pc。



注：带有误差棒的圆点为实测的尘埃消光数据，黑色实线为等温的气体静力学模型[4]，蓝色实线为本文所采用的多方的气体静力学模型。

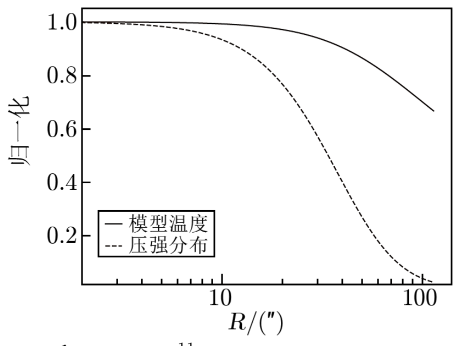
图 2　观测数据与理论模型的对比

①https://magix.astro.uni-koeln.de/



注：最优参数值取自最大似然值，左右误差分别为 16% 和 84% 的分位数。

图 3　利用蒙特卡洛优化算法得到的参数的一维和二维后验函数分布图



注：中心的温度和压强分别为 10 K 和 5.14×10^{-11} Pa。

图 4　归一化的模型温度和压强随着云核半径的变化分布

把拟合的最佳参数值带入式 (5) 和 (6)，并结合式 (1) 可以得出星前核 B68 的温度结构和压强结构。图 4 显示了归一化的温度和压强的径向分布，其中心的温度和压强分别为 10 K 和 5.14×10^{-11} Pa，边界的温度和压强分别为 6.7 K 和 1.3×10^{-12} Pa。相较于之前的等温模型[4]，该模型给出的边界温度值更符合 $6\sim7$ K 的观测结果[17]。与气体的温度测量结果相比，边界的尘埃温度测量值更高，这主要是由星际辐射场造成[5, 6, 20]。目前的模型没有考虑星际辐射场的影响，因此模型无法解释尘埃的温度测量结果。另外，B68 位于圈 1 超泡 (Loop 1 superbubble) 的附近。由伦琴 X 射线天文台 (ROSAT) 的 X 射线观测结果可知，圈 1 超泡的压强为 1.2×10^{-12} Pa[21] 左右，该模型得出的边界压强为 1.3×10^{-12} Pa，非常接近观测值。最后，通过式 (8)，可以得出星前核 B68 的质量为 0.8 $M_\odot$。假设 30% 的气体质量最终转化成恒星质量[22]，在自引力的作用下有望形成一个 0.24 $M_\odot$ 的恒星，其光谱型为 M5[23, 24]。

与之前 Li 等人[25] 的模型相比，我们所采用的模型更简单，自由参数更少，也更广为人知，是研究恒星结构的基本方程[18]。而且，Li 等人[25] 提出的模型是一个新发展的较复杂的模型，满足的条件也比较苛刻，必须存在一个径向的线性速度场，这对模型的应用是一个非常严格的限制。

4 总结与展望

在球对称坐标系中，我们采用多方气体静力学模型对 B68 的尘埃消光数据进行了拟合。在观测数据与模型的拟合过程中，利用了蒙特卡洛的优化算法寻找自由参数的后验分布函数，进而得到了最佳的拟合参数及其误差。与之前的等温静力学模型不同，本文采用的多方气体静力学模型不仅能拟合观测的消光数据，也能合理解释气体的温度结构和压强。另外，模型给出的星前核 B68 的质量为 0.8 $M_\odot$，假设气体质量转化成恒星质量的效率为 30%，在自引力作用下有望形成一颗质量为 0.24 $M_\odot$，光谱型为 M5 的恒星。

阿塔卡玛毫米/亚毫米波阵列望远镜 (ALMA) 有足够高的分辨率和灵敏度，因此可探测到银道面上距离较远的星团形成区中星前核的结构。由于星团形成区环境的复杂性，等温模型可能会有一定的局限性，后续将尝试利用多方气体静力学模型研究星前核的密度分布。

参考文献：

[1] Larson R B. MNRAS, 1969, 145: 271
[2] Shu F H. ApJ, 1977, 214: 488
[3] McKee C F, Tan J C. Nature, 2002, 416(6876): 59
[4] Alves J F, Lada C J, Lada E A. Nature, 2001, 409(6817): 159
[5] Nielbock M, Launhardt R, Steinacker J, et al. A&A, 2012, 547: A11
[6] Roy A, André P, Palmeirim P, et al. A&A, 2014, 562: A138
[7] Ho P T P, Townes C H. ARA&A, 1983, 21: 239

[8] Lai S P, Velusamy T, Langer W D, et al. AJ, 2003, 126(1): 311
[9] Hotzel S, Harju J, Juvela M. A&A, 2002, 395: L5
[10] Tafalla M, Myers P C, Caselli P, et al. ApJ, 2002, 569(2): 815
[11] Bergin E A, Alves J, Huard T, et al. ApJ, 2002, 570(2): L101
[12] Hotzel S, Harju J, Juvela M, et al. A&A, 2002, 391: 275
[13] Di Francesco J, Hogerheijde M R, Welch W J, et al. AJ, 2002, 124(5): 2749
[14] Laurie E U C, Klaus H. arXiv:2106.08333, 2021
[15] Maret S, Bergin E A, Tafalla M. A&A, 2013, 559: A53
[16] Bohlin R C, Savage B D, Drake J F. ApJ, 1978, 224: 132
[17] Bergin E A, Maret S, van der Tak F F S, et al. ApJ, 2006, 645(1): 369
[18] Chandrasekhar S. An introduction to the study of stellar structure. Chicago: the University of Chicago press, 1939
[19] Möller T, Bernst I, Panoglou D, et al. A&A, 2013, 549: A21
[20] Bergin E A, Tafalla M. ARA&A, 2007, 45(1): 339
[21] Breitschwerdt D, Freyberg M J, Egger R. A&A, 2000, 361: 303
[22] Alves J, Lombardi M, Lada C J. A&A, 2007, 462(1): L17
[23] Morgan W W, Keenan P C, Kellman E. An atlas of stellar spectra, with an outline of spectral classification. Chicago: the University of Chicago press, 1943
[24] Johnson H L, Morgan W W. ApJ, 1953, 117: 313
[25] Li D, Lou Y Q, Esimbek J. MNRAS, 2018, 473(2): 2441

The Polytropic Static Gas Model of Prestellar Core

LI Da-lei

(XinJiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: Prestellar core is important to improve our understanding about the initial conditions and the earliest stage of star formation. Density and temperature are the basic physical parameters to characterize the prestellar core, and also are two required input physical parameters to study excitation conditions and estimate the column densities of molecular lines under non local thermodynamic equilibrium, and run the astrochemical models. Barnard 68 (B68) is a typical prestellar core and its structure is quite similar with a sphere, which makes it a proper source to test star formation models. Under the spherical coordinate system, the extinction data of B68 is fitted using polytropic static gas model, which gives a mass of 0.8 $M_\odot$ for B68. Compared to the previous isothermal static gas model, the model adopted here not only can fit the dust extinction data very well, but also agrees with the observational non-uniform gas temperature, and furthermore can meet the observational pressure.

Key words: molecular cloud core; star formation; prestellar core; hydrodynamics